
LAS MICROALGAS COMO FUENTE DE NUTRIENTES EN VÍAS DE DESARROLLO.

Trabajo de fin de Grado

Grado en Nutrición Humana y Dietética

Autor: Esteban Agudelo Rivera

Tutor: Basilio José Zafrilla Requena

Curso académico: 2019-2020

Resumen

La población mundial está en constante crecimiento obligando a los gobiernos y autoridades sanitarias a buscar nuevas formas de alimentar a las próximas generaciones. Las microalgas, debido a sus excelentes características nutricionales, se han convertido en una alternativa muy potente para completar a los vegetales tradicionales pensando en el suministro de nutrientes de cara al futuro. Además, la mayor parte de las especies de microalgas contienen oligoelementos beneficiosos para el organismo, llegando a clasificarse como un alimento funcional, y capaz de prevenir enfermedades. Este trabajo tiene como objetivo analizar las diferencias existentes entre los vegetales tradicionales y la biomasa de microalgas y estudiar los posibles efectos beneficiosos adicionales para la salud.

Para llevar a cabo esta investigación se ha utilizado la base de datos PubMed, filtrando los estudios realizados en humanos y con una antigüedad de 10 años. Las palabras claves empleadas fueron: protein, food análisis, nutrition and antioxidants y las especies de microalgas estudiadas fueron: *Spirulina sp.*, *Chlorella sp.*, *Dunaliella salina*, *Haematococcus pluvialis*.

Los resultados muestran diferencias, entre los vegetales tradicionales y estas especies de microalgas, en la forma de producción y en la composición nutricional. Las microalgas son capaces de producir grandes cantidades de proteínas, carbohidratos y lípidos, destacando en algunos casos por encima de los vegetales tradicionales. La producción de las microalgas se lleva a cabo en un medio acuoso mientras que los vegetales comunes necesitan tierra o sustratos húmedos. Actualmente, la producción masiva de las microalgas conlleva un gran coste económico. En cuanto a los beneficios para la salud, existen una gran cantidad de estudios que relacionan la ingesta diaria de diferentes especies de microalgas con efecto antioxidante e hipolipemiente. Sin embargo, son necesarios más estudios que confirmen estos resultados.

Palabras clave: protein, food análisis, nutrition, antioxidants, *Spirulina*, *Chlorella*, *Dunaliella*, *Haematococcus*.

Abstract

The world's population is constantly growing, forcing governments and health authorities to look for new ways to feed the next generations. The microalgae, due to their excellent nutritional characteristics, have become a very powerful alternative to complete the traditional vegetables thinking about the supply of nutrients for the future. In addition, most of the microalgae species contain trace elements that are beneficial for the organism, and they have been classified as functional food, capable of preventing diseases. The aim of this work is to analyse the differences between traditional plants and microalgae biomass and to study the possible additional beneficial effects on health.

To carry out this research, the PubMed database has been used, filtering the studies carried out on humans and dating back 10 years. The key words used were: protein, food analysis, nutrition and antioxidants and the microalgae species studied were: *Spirulina* sp., *Chlorella* sp., *Dunaliella salina*, *Haematococcus pluvialis*.

The results show differences, between traditional plants and these microalgae species, in the way of production and in the nutritional composition. Microalgae are capable of producing large amounts of proteins, carbohydrates and lipids, standing out in some cases over traditional vegetables. The production of microalgae takes place in an aqueous environment while common vegetables need soil or moist substrates. Currently, the mass production of microalgae entails a great economic cost. As for health benefits, there are many studies that relate the daily intake of different species of microalgae with antioxidant and hypolipemic effect. However, more studies are needed to confirm these results.

Key words: protein, food análisis, nutrition, antioxidants, *Spirulina*, *Chlorella*, *Dunaliella*, *Haematococcus*.

Índice

1. Introducción.....	5
1.1. Nutrición y vegetales	5
1.2. Clasificación de las microalgas.....	5
1.2.1. Spirulina.....	5
1.2.2. Chlorella.....	6
1.2.3. Dunaliella	6
1.2.4. Haematococcus	7
1.3. Metabolismo y crecimiento industrial de las microalgas.....	7
1.4. Aplicaciones de las microalgas	8
1.5. Las microalgas como alimentos	8
1.5.1. Formulación de alimentos modificados.....	8
1.5.2. Legislación de las microalgas	9
2. Objetivo.....	11
3. Metodología	12
3.1. Términos generales de la revisión bibliográfica	12
3.2. Cribado de la bibliografía.....	12
4. Resultados	14
4.1. Consumo de vegetales en España.....	14
4.2. Composición nutricional de los vegetales.....	16
4.3. Composición nutricional de las microalgas estudiadas.....	17
4.4. Principales bioactivos de las microalgas con evidencia de ser beneficiosos para la salud 17	
4.4.1. Ficocianina	17
4.4.2. β-caroteno.....	18
4.4.3. Astaxantina	18
4.4.4. Luteína	19
4.4.5. Omega-3	19
4.5. Métodos de cultivo de las microalgas	19
4.6. Métodos de cosecha de las microalgas.....	20
5. Discusión.	21
5.1. Valor nutricional de las microalgas.....	21
5.2. Diferencias entre los valores nutricionales de los vegetales tradicionales y las principales especies de microalgas comercializables.....	21
5.3. Las microalgas como farmacia natural	23
5.3.1. Dislipidemias.....	23

5.3.2.	Obesidad.....	25
5.3.3.	Síndrome metabólico.....	26
5.3.4.	Antioxidantes	27
5.3.5.	Antiinflamatorio	29
5.4.	Una nueva agricultura	30
6.	Conclusión.....	32
7.	Bibliografía	33

1. Introducción

1.1. Nutrición y vegetales

La alimentación del ser humano ha ido variando a lo largo de los siglos. Los primeros humanos fueron cazadores y recolectores nómadas. Su alimentación se basaba en las presas que conseguían cazar y en las bayas y raíces que podían recolectar. El desarrollo de la agricultura y la ganadería fue el primer cambio fundamental que se dio en la historia de la alimentación. Esta nueva forma de vida supuso un cambio en el hombre de aquel momento, volviéndose sedentario, empezando a cultivar y a criar animales para alimentarse. Conforme iban pasando los siglos las diferentes poblaciones del mundo iban tomando diferentes elecciones alimentarias. Podemos observar estas diferencias si estudiamos a las poblaciones de diferentes etapas y regiones. Por ejemplo, en el antiguo Egipto, la base de la alimentación eran los animales de cría (cerdos, res, cordero), y los grandes cultivos de vegetales como verduras (cebollas, puerros, lechugas, ajos) y legumbres (garbanzos, lentejas) (1). La forma de alimentarse también depende de los recursos económicos de la sociedad en aquel momento, dando como resultado que las clases más ricas consumían más carne y las más desfavorecidas no tenían más remedio que recurrir a una dieta más rica en vegetales e incluir carne muy ocasionalmente. Pero, esto no era igual para todas las poblaciones. En la antigua Grecia el 80% del aporte energético total provenía de los cereales, ya que la carne para ellos era un alimento despreciable.(1) Si seguimos avanzando a lo largo de la historia podemos ver como otras culturas utilizaban otros alimentos muy poco extendidos en la actualidad. Este es el caso de México, donde se alimentaban con algas verdeazuladas, concretamente con *Spirulina máxima* que se producía en el lago “Texcoco” durante la época prehispánica. Este alimento lo llamaban “tecuitlatl” y durante la conquista fue recolectado y vendido para consumo humano. Desafortunadamente, se perdió con el tiempo (2).

1.2. Clasificación de las microalgas

Las microalgas son un gran grupo de microorganismos fotosintéticos provenientes no solo de los sistemas marinos, sino también del agua dulce, ambientes salinos, suelos húmedos y rocas. En este trabajo se tratarán las especies más comercializadas.

1.2.1. Spirulina

Spirulina (*Arthrospira*) es una cianobacteria o alga verdeazulada perteneciente a la familia Oscillatoriaceae. Crece naturalmente en zonas calientes y alcalinas, en el mar y agua dulce de Asia, África, Europa y América (2). *Spirulina platensis* (*Arthrospira*

platensis), *Spirulina máxima* (*Arthrospira máxima*) y *Spirulina fusiformis* (*Arthrospira fusiformis*) son las más investigadas (3).

La biomasa de *Spirulina* es una fuente rica de macro y micronutrientes incluyendo una alta calidad de proteína, grandes cantidades de antioxidantes como β -carotenos, ficocianina, minerales (K, Na, Ca, Mg, Fe, Zn), vitaminas (tocoferoles), ácidos grasos poliinsaturados, especialmente γ -linoleico y compuestos fenólicos.(4)

1.2.2. Chlorella

Chlorella es una microalga unicelular de color verde que crece en agua dulce. Dentro de las especies más estudiadas encontramos a *Chlorella vulgaris* y a *Chlorella pyrenoidosa*. Suele ser administrada como suplemento nutricional debido al amplio rango de nutrientes que posee como son los minerales, proteínas, vitaminas, fibra, ácidos grasos omega-3, clorofila, carotenoides (5).

1.2.3. Dunaliella

Dunaliella salina es una microalga unicelular, de color verde en condiciones favorables, que crece principalmente en ambientes con gran presencia de sales. Destaca por la capacidad de producir β -caroteno y glicerol cuando las concentraciones salinas son muy elevadas, está expuesta a una alta radiación solar o tiene una limitación en el suministro de nitrógeno y/o fósforo (6). En estas condiciones, pierde su color verde (degradando la clorofila de sus cloroplastos) y comienza a sintetizar grandes cantidades de β -caroteno tornándose de un naranja intenso (Figura 1).

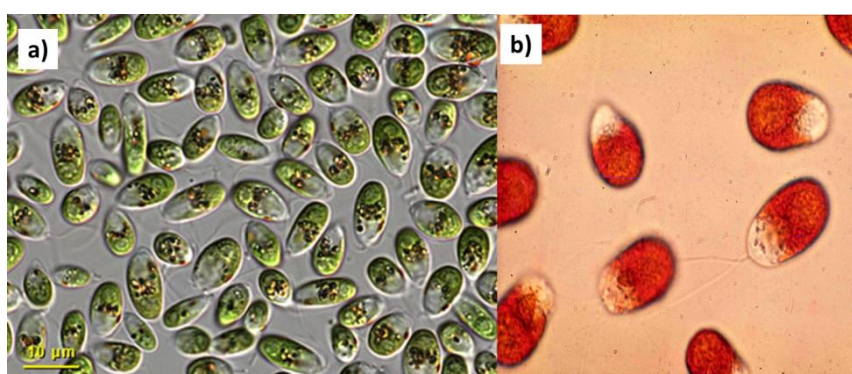


Figura 1. Detalle de células de *Dunaliella salina*. A) Células sin limitación de nutrientes y poco estresadas. B) Células muy estresadas por radiación y alta salinidad, acumulando grandes cantidades de β -caroteno y glicerol. (Tomado de Phycokey: <http://cfb.unh.edu/phycokey/phycokey.htm>).

Se conoce que este organismo es capaz de disminuir su contenido de lípidos en respuesta a una disminución de nitrógeno en el ambiente de crecimiento, lo cual no es común dentro de las otras especies de microalgas. Y, por el contrario, puede acumular gran cantidad de lípidos en respuesta a ambientes con altas concentraciones de sal. El porcentaje de lípidos en peso seco que puede llegar a alcanzar es de un 35% (7).

1.2.4. *Haematococcus*

Haematococcus pluvialis es una microalga unicelular de color verde que crece en agua dulce. Destaca por acumular grandes cantidades de astaxantina bajo condiciones de estrés como grandes concentraciones de sal, deficiencia de nitrógeno, altas temperaturas y luz (8). En la Figura 2 se puede observar la evolución de una célula de *Haematococcus pluvialis* produciendo cantidades crecientes de astaxantina.

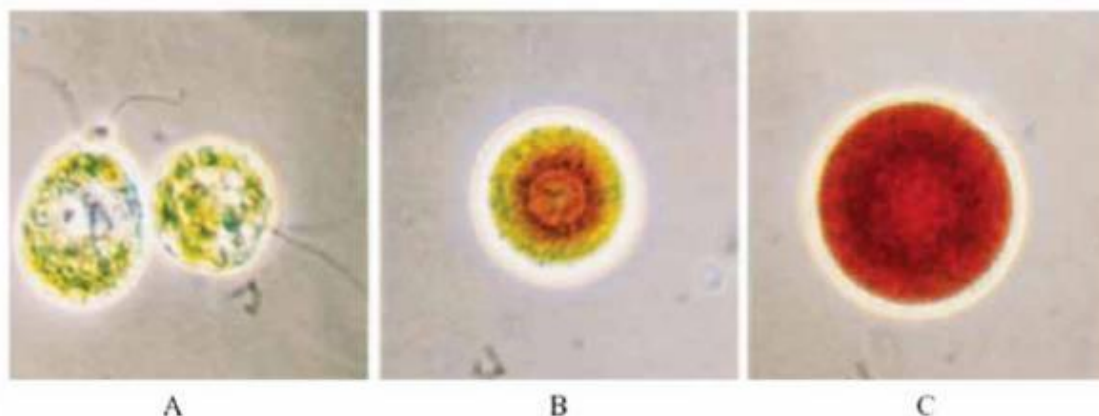


Figura 2. Detalle de células de *Haematococcus pluvialis*. A) Célula verde. B) Célula con acumulación de carotenoides. C) Aumento del tamaño con quistes rojos. Tomado de Kurmen y col., 2013 (9).

1.3. Metabolismo y crecimiento industrial de las microalgas

Los componentes inorgánicos que necesitan las microalgas para su crecimiento son el CO₂, N, S, P y una fuente lumínica que produzca la energía para su crecimiento. En condiciones naturales crecen utilizando la luz solar, pero en el laboratorio pueden utilizar luz led, fluorescente o incandescente. Las microalgas poseen una gran flexibilidad en su metabolismo adaptándose a las diferentes condiciones ambientales que se pueden encontrar. Es por esto que en determinadas condiciones pueden incrementar la síntesis de ciertas moléculas y disminuir o abolir la expresión de otras. Es conveniente resaltar su gran adaptabilidad y su capacidad de generar grandes cantidades de lípidos, proteínas, carbohidratos y otros micronutrientes como pueden ser carotenoides y vitaminas frente a

determinas condiciones y en diferentes entornos (10). Por otro lado, esto también puede llegar a ser un inconveniente, ya que controlar el entorno en el que crecen no siempre es fácil.

Para cosechar estos microorganismos se utilizan costosas técnicas de separación como centrifugación o filtración que consumen mucha energía. Para el secado de los pequeños cultivos se puede utilizar la energía solar en secaderos con ventilación forzada, pero para el cultivo extensivo en grandes superficies es necesario recurrir a tecnologías de tipo “spray-drying” o “freeze-drying”. Todos estos procesos se traducen en un elevado coste económico que pueden llegar a minimizar la rentabilidad de su producción a gran escala. Otro problema reside en el tratamiento para poder destruir la gruesa pared de celulosa que presentan muchas especies de microalgas y que recubren los ingredientes o extractos que producen. Son necesarios nuevos desarrollos basados en tratamientos enzimáticos, procesos asistidos en ultrasonidos o microondas y homogeneizadores de alta presión para el tratamiento para el tratamiento de las microalgas y disminuir los costes de estos (10).

1.4. Aplicaciones de las microalgas

Actualmente, se está abriendo un gran nicho de mercado para la mayoría de las especies comercializables de manera que resulta muy interesante continuar su estudio, optimizando las ventajas que nos proporcionan frente a otros recursos de alimentación e investigando sobre la bioactividad de sus metabolitos. Estas aplicaciones que se están estudiando pueden ir desde formulación para alimentos, alimentación de animales, cosméticos, productos de salud, fertilizantes, hasta biocombustible o marcadores moleculares (11).

1.5. Las microalgas como alimentos

Son varios autores los que han estado investigando las formas de introducir las microalgas dentro de otros alimentos convencionales para mejorar sus características nutricionales.

1.5.1. Formulación de alimentos modificados

Fradique y col.(12) analizaron las diferencias nutricionales y organolépticas entre una pasta control y pastas suplementadas con biomasa de *Chlorella vulgaris* y *Spirulina máxima* con unas concentraciones de 0,5%, 1%, 2%. Los resultados en cuanto a las características nutricionales indican que no hay diferencias significativas ($p < 0,05$) en cuanto a proteínas, lípidos y energía de las pastas enriquecidas frente a la de control. Sin

embargo, la adición de estas microalgas a la pasta incrementa la toma diaria de antioxidantes y ácidos grasos poliinsaturados. Los resultados para las características organolépticas son los siguientes. El tiempo de cocción fue superior en la pasta con biomasa de *Chlorella*, probablemente debido al alto contenido en almidón. En la textura ambas pastas adicionadas con la biomasa se observó un incremento de la firmeza ($p < 0,05$), pero mantuvieron texturas similares a la control después de la cocción. Por último, el color fue diferente en las pastas enriquecidas, adquirieron tonalidades naranjas y rojizas, más atractivas para el consumidor.

En conclusión, las pastas enriquecidas con la biomasa de estas microalgas presentaron una mayor riqueza nutricional sin ver afectadas sus propiedades organolépticas.

En otro estudio publicado por Baky y col.(13) se evaluaron los beneficios originados al añadir biomasa de *Spirulina* a galletas en concentraciones de 0,3%, 0,6%, 0,9%. Los resultados demostraron que, a nivel de propiedades del producto, solamente se observaron cambios en la firmeza aumentando en las enriquecidas. En cuanto al olor y el color tanto el control como las galletas suplementadas presentaron las mismas propiedades organolépticas. En conclusión, la adición de la biomasa de *Spirulina* a las galletas mejoró el perfil nutricional de estas, sin afectar a penas al resto de parámetro del producto.

1.5.2. Legislación de las microalgas

Para poder comercializar un producto alimenticio del que no se tiene constancia de su uso, primero debe ser aprobado y debe cumplir con la Regulación (EU) 2015/2283 para los “novel foods”. El término de “novel food” define un alimento que no ha sido consumido por un gran grupo de personas en EU antes del 15 de mayo de 1997, cuando la nueva regulación de “novel food” entro en vigor. Además, este término incorpora a los nuevos alimentos, alimentos producidos con nuevas tecnologías y procesos de producción o alimentos que se han consumido tradicionalmente fuera de la UE. Por tanto, los principios que deben seguir estos alimentos para poder ser comercializados son: que sean seguros para los consumidores, que estén debidamente etiquetados para no confundir, por último, si el nuevo alimento está destinado a sustituir otro, que este no sea nutricionalmente inferior para el consumidor. (14) Para que las microalgas puedan comercializarse y formar parte de productos que influyan en la salud de las personas, primero deben dejar de ser “novel food”.

Actualmente, gracias al gran nicho de mercado que existe por parte de las microalgas, el interés general tanto de las grandes industrias como la creciente sensibilización de las personas frente a una alimentación más sostenible para el planeta está poniendo en alza el estudio de las microalgas como un alimento del futuro. Para ello son necesarios muchos estudios que avalen la seguridad y la eficacia de estas microalgas para el consumo humano y que se asocien a los beneficios en materia de salud.

2. Objetivo

Los objetivos principales de este trabajo son:

- Estudiar las diferencias que existen entre las principales especies de microalgas comercializables (*Spirulina sp.*, *Chlorella sp.*, *Dunaliella salina*, *Haematococcus pluvialis*) y los vegetales tradicionales con un mayor consumo en nuestra sociedad.
- Evaluar los beneficios que puede aportar al organismo la inclusión de la biomasa de estas especies en la dieta teniendo en cuenta sus principales bioactivos
- Evaluar los principales sistemas de cultivo de microalgas y valorar si su implementación a nivel industrial puede convertirse en una alternativa a la agricultura tradicional.

3. Metodología

3.1. Términos generales de la revisión bibliográfica

La metodología empleada en este trabajo consta de una búsqueda bibliográfica realizada mediante la base de datos de PubMed. Las palabras claves utilizadas para realizar la búsqueda fueron: *Spirulina*; *Chlorella*; *Dunaliella salina*; *Haematococcus pluvialis*; protein; food analysis; nutrition and antioxidants. Para realizar la estrategia de búsqueda se emplearon los MeSH de cada especie de microalga en el apartado de título/abstract, acompañado de cada una de las palabras claves utilizadas (*protein*, *food análisis*, *nutrition* and *antioxidants*). Para centrar la búsqueda se excluyeron todos aquellos artículos que tuvieran más de 10 años en el momento de la búsqueda (diciembre de 2019). Además, también se excluyeron aquellos artículos que no estuvieran realizados en humanos.

3.2. Cribado de la bibliografía

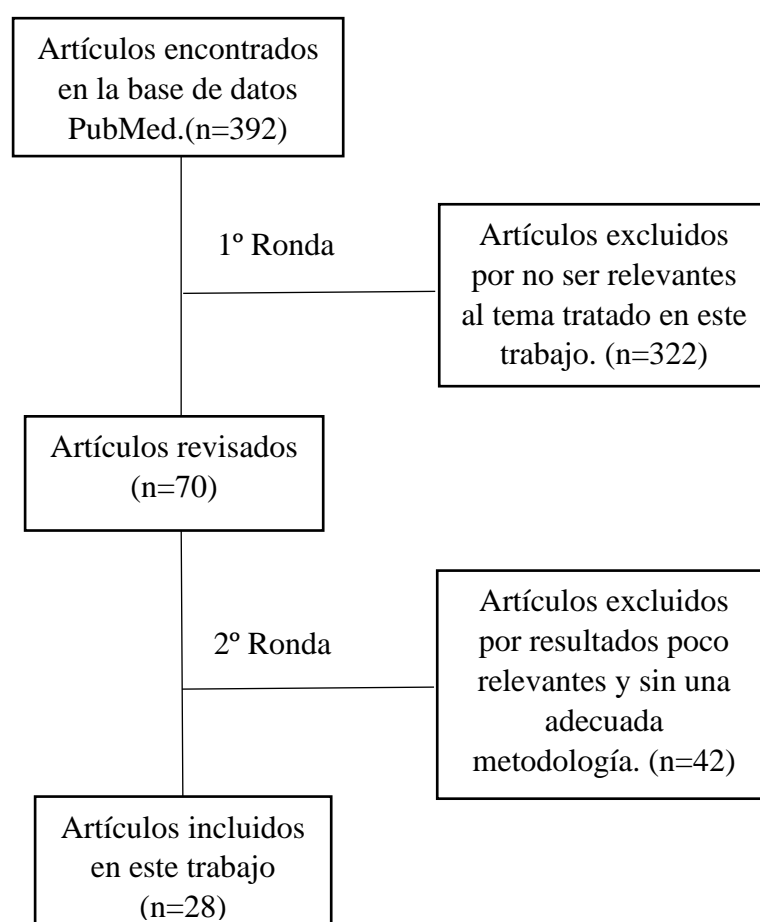


Figura 3. Diagrama de flujo para la literatura revisada y empleada en este TFG

1º Ronda de cribado: Se leyó el resumen de cada artículo buscando que el tema tratado fuera en relación con las características nutricionales de las microalgas y/o con los beneficios de la salud por la ingesta diaria de estas. Se excluyeron los artículos que no estaban relacionados con la nutrición, los que trataban aspectos cosméticos (cuidado de la piel) y los que trataban de forma muy específica moléculas aisladas.

2º Ronda de cribado: Se analizó el artículo entero, prestando especial interés a la metodología empleada y a los resultados. Se excluyeron aquellos artículos donde la metodología no era adecuada y presentaba muchas limitaciones. También se excluyeron artículos donde los resultados no eran relevantes y no aportaban conocimiento sobre los objetivos tratados en este trabajo.

En la Tabla 1, se recoge un resumen del número de artículos que se encontraron para cada especie de microalga durante la búsqueda y que se utilizaron en este trabajo. En la Figura 3 se muestra el proceso por el cual fueron seleccionados los artículos.

Tabla 1. Resumen de artículos por especie de microalga

Especie	Artículos encontrados	Artículos seleccionados*	Artículos incluidos en este trabajo*
<i>Spirulina sp.</i>	261	37	15
<i>Chlorella sp.</i>	91	19	6
<i>Dunaliella salina</i>	16	3	2
<i>Haematococcus pluvialis</i>	24	11	5

*Artículos seleccionados: Después de la 1º ronda de cribado

*Artículos incluidos: Después de la 2º ronda de cribado

4. Resultados

4.1. Consumo de vegetales en España

Según el informe de consumo alimentario de 2018 en España los vegetales más consumidos fueron el tomate, la cebolla y el pimiento por parte de las verduras. Por parte de las legumbres, fueron los garbanzos, las alubias y las lentejas. En cuanto a los frutos secos fueron las nueces y almendras (15). En las figuras 4-6 se puede observar el volumen de consumo de estos vegetales por miles de kg para toda la población española. El ministerio de pesca, agricultura y alimentación publicó un documento con los balances de cereales en España en la campaña 2018/2019 dando como resultado que los cereales más consumidos en alimentación humana fueron el trigo, maíz, centeno y avena (16). Estos resultados se pueden ver en la figura 7.

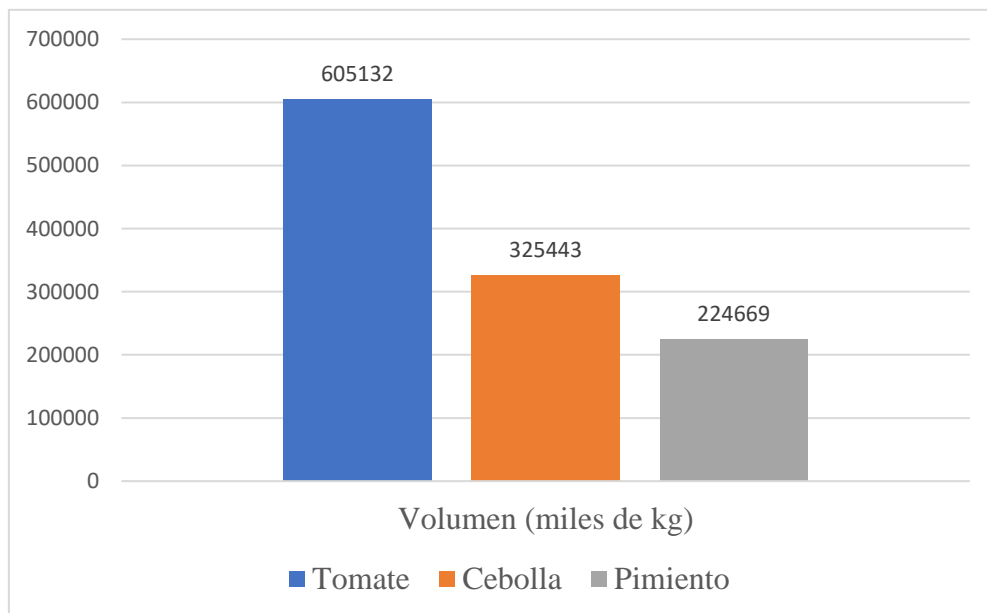


Figura 4. Consumo de hortalizas en España 2018

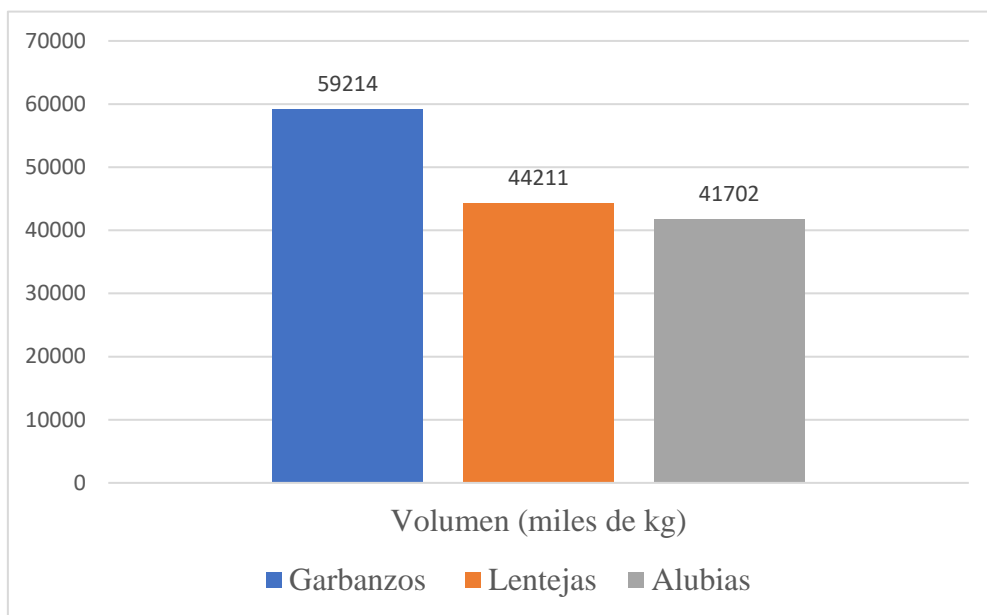


Figura 5. Consumo de legumbres en España 2018

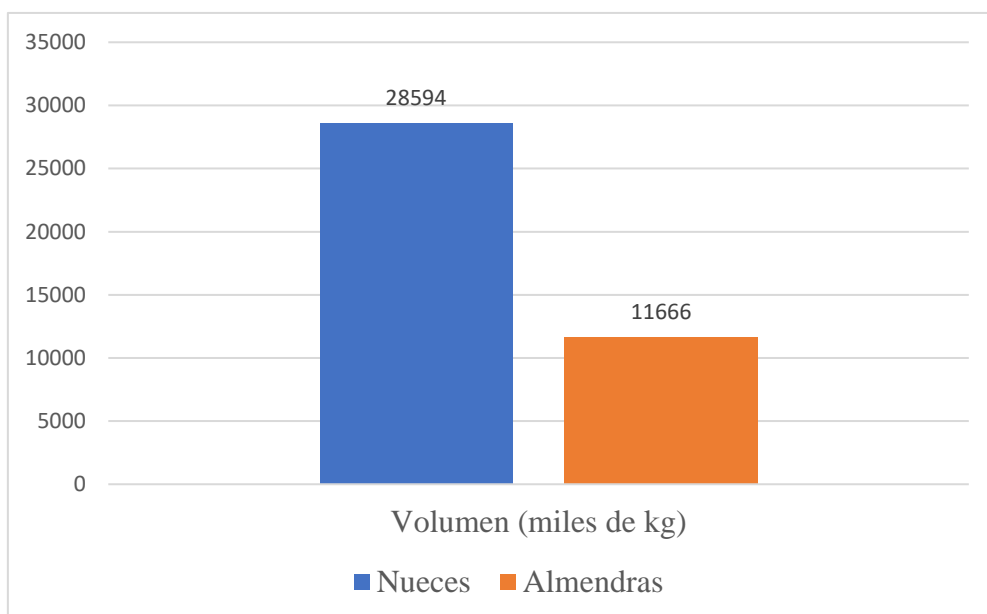


Figura 6. Consumo de frutos secos en España 2018

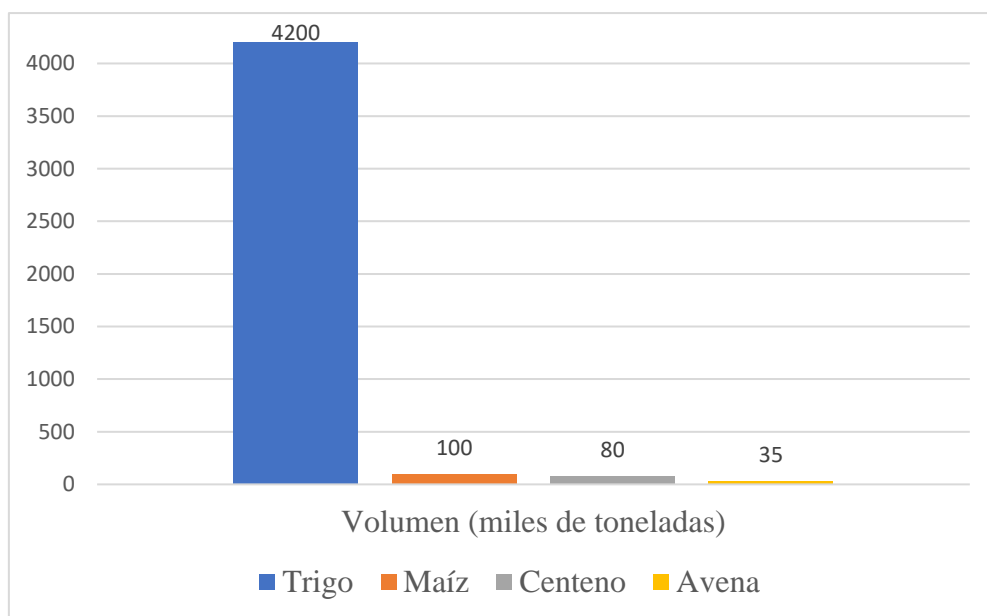


Figura 7. Consumo de cereales en España 2018

4.2. Composición nutricional de los vegetales

Para analizar la composición de estos alimentos, se utilizó la base de datos “Bedca” que es la base de datos española de composición de alimentos (17). En la Tabla 2 se resume la composición nutricional a nivel de macronutrientes (carbohidratos, proteínas y lípidos) y fibra de los alimentos detallados en el apartado anterior. Además, se incluye la composición nutricional de la soja ya que es considerada una legumbre muy completa y balanceada.

Tabla 2. Composición nutricional vegetales (g/100g de alimento en peso seco)

Alimento		Proteínas	Carbohidratos	Lípidos	Fibra
Hortalizas	Tomate	0,9	3,5	0,1	1,1
	Cebolla	1,1	5,3	-	1,8
	Pimiento rojo	1,3	4,5	0,6	1,8
Legumbres	Garbanzos	19,3	49,2	6,3	15
	Lentejas	24,8	48,7	1,2	9,7
	Alubias	22,2	41,6	1,3	19,7
	Soja	35,9	9,7	18,6	15,7

F.seco	Nueces	14	3,3	63,3	5,2
	Almendras	19,1	6,2	45,2	8,3
Cereales	Trigo	11,7	61	2	10,3
	Maíz	8,4	85,6	0,9	2,7
	Centeno	14,8	79,8	2,5	14,6
	Avena	16,9	66,3	6,9	10,6

4.3. Composición nutricional de las microalgas estudiadas

En cuanto a la composición nutricional de las microalgas hay que tener en cuenta que el tipo de condiciones de cultivo y los métodos de análisis van a influir el contenido total de nutrientes.

Molino y col. (18) realizaron una comparación de la composición nutricional de varias especies de microalgas, centrándose sobre todo en las variaciones de contenido en proteínas, carbohidratos, lípidos y fibra. En la Tabla 1 se recoge un breve resumen de la composición de las microalgas que estudia este trabajo.

Tabla 3. Composición nutricional de las principales especies de microalgas (g/100g en peso seco). Tomado de Molino y col. (18).

Microalga	Proteínas	Carbohidratos	Lípidos	Fibra
<i>Spirulina platensis</i>	40-63	7-22	4-9	8-40
<i>Chlorella vulgaris</i>	20-60	5-50	3-26	16-35
<i>Dunaliella salina</i>	10-55	25-40	3-17	9
<i>Haematococcus pluvialis</i>	10-35	1-7	2-3	15-35

4.4. Principales bioactivos de las microalgas con evidencia de ser beneficiosos para la salud

4.4.1. Ficocianina

Ficocianina o C-ficocianina es una proteína de color azul, presente en la mayoría de las cianobacterias, que se encuentra en grandes concentraciones (casi un 15% del peso)

seco de la biomasa) en el aparato fotosintético de *Spirulina sp.*(2) . Se sabe que tiene un poder antioxidante, gracias a la capacidad de neutralizar radicales libres. En cuanto a las actividades antiinflamatorias, la ficocianina inhibe la formación de citoquinas proinflamatorias como TNF α , suprime la expresión de ciclooxigenasa-2 (COX-2) y disminuye la producción de prostaglandina E(2) (19). Además, reduce la concentración de los lípidos a través de la búsqueda de radicales libres, inhibiendo la peroxidación de los lípidos, inhibiendo también la expresión de la NADPH oxidasa e incrementando la actividad de la GSH peroxidasa y superóxido dismutasa. Que disminuya la expresión de NADPH se puede traducir en una disminución del metabolismo de las grasas, ya que es un cofactor directamente implicado en este proceso (4).

4.4.2. β -caroteno

El β -caroteno es un tipo de carotenoide, implicado en mecanismos de fotosíntesis y fotoprotección de organismos fotosintéticos, que posee un potente poder antioxidante y antiinflamatorio. Se ha demostrado que el β -caroteno protege frente a la peroxidación de lípidos mediada por oxígeno. Además, inhibe la producción de óxido nítrico y prostaglandina E(2), suprime la expresión de iNOS, COX-2, TNF α y suprime la transcripción de citoquinas inflamatorias incluyendo IL-1 β , IL-6, IL-2 en las células macrófagas estimulada por los lipopolisacáridos (18). Otra de las propiedades importantes que posee el β -caroteno es que parte de el se convierte directamente en retinol (Vitamina A) una vez se ha digerido. *Dunaliella salina* ha sido reconocida como una fuente de β -carotenos, ya que hasta un 80% del contenido total de carotenoides que produce pueden ser β -carotenos (18).

4.4.3. Astaxantina

La astaxantina es un carotenoide, concretamente una xantofila, posee un gran efecto antioxidante y antiinflamatorio debido su capacidad para neutralizar radicales libres. Este efecto antioxidante es mucho más potente que en otros carotenoides como el β -caroteno. La microalga *Haematococcus pluvialis* es capaz de acumular hasta un 4-5% de astaxantina en peso seco, produce el isómero 3S, 3S' que es el mismo que se encuentra en el salmón. Además, la astaxantina no puede convertirse en vitamina A, eso significa que un exceso no causara ninguna intoxicación por hipervitaminosis A (20). En cuanto a las dosis la astaxantina natural comercializada en Europa gira entorno a las 12mg, pero las autoridades competentes han aprobado las dosis de 24 mg. No se han identificado efectos nocivos en los estudios realizados con humanos para ninguna dosis (21).

4.4.4. Luteína

Es un carotenoide presente en las microalgas, principalmente en la especie *Chlorella*. Tiene un efecto antioxidante y comparte el mecanismo de acción del β -caroteno.

4.4.5. Omega-3

Los ácidos grasos omega-3, incluyendo el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el ácido docosahexaenoico (DHA), presentan un gran poder antiinflamatorio (7). Los ácidos grasos omega-3 podemos encontrarlos mayoritariamente en especies de microalgas como *Ulkenia sp.* y *Schizochytrium sp.* con concentraciones de hasta un 32% y 22,5% (18). Sin embargo, también se puede encontrar en especies como *Chlorella sp.* y *Dunaliella sp.* las cuales han sido estudiadas en este trabajo (22).

4.5. Métodos de cultivo de las microalgas

Los principales formatos de cultivo de microalgas pueden dividirse en dos grandes bloques.

- **Sistemas abiertos:** Son aquellos sistemas que utilizan espacios abiertos en constante comunicación con la atmosfera. Pueden utilizar aguas superficiales naturales (estanques, lagos y lagunas) o estanques artificiales. Este tipo de producción es la más rentable ya que no necesita de grandes inversiones ni mucho mantenimiento, a pesar de que presenta una menor productividad y eficiencia que los sistemas cerrados. Esta diferencia viene dada a raíz de que es más susceptible a contaminaciones por otras algas o bacterias indeseadas, y a las condiciones ambientales, ya que no se puede controlar ni la temperatura del agua, ni el CO₂, ni la luz que reciben los cultivos. Por ello, estos sistemas son utilizados para aquellas especies de microalgas que puedan crecer bajo condiciones menos específicas que otras. Por tanto, las principales ventajas de esos sistemas es que son baratos, fáciles de construir y con un bajo coste de funcionamiento (23).
- **Sistemas cerrados o fotobiorreactores (PBR):** Son aquellos sistemas donde las condiciones de crecimiento están muy bien controladas, permitiendo producir con garantías una sola cepa de microalga. Estos sistemas presentan una mayor productividad y eficiencia que los sistemas abiertos, ya que permiten mantener las condiciones necesarias para el crecimiento de los cultivos. Además, dificultan la proliferación de otros organismos no deseables. El problema es que los costes de construcción, mantenimiento y operación de los fotobiorreactores es muy

elevado, llegando a suponer una inversión inicial 10 veces superior al de los sistemas abiertos (23).

Es en los cultivos abiertos donde se lleva a cabo la producción de forma masiva de la biomasa de las microalgas, en este momento ocupa el 99% de la producción total mundial. Las mayores dificultades que presenta este tipo de producción tienen que ver con controlar las condiciones del cultivo, como la temperatura del agua, la luz, o la contaminación por otras bacterias o algas no deseadas. Sin embargo, en este momento la única forma de producir microalgas de forma masiva al menor precio posible es con los sistemas de cultivo abierto (10).

4.6. Métodos de cosecha de las microalgas

El método de recuperación o cosecha es considerado uno de los pasos más complejos y costosos de la agricultura de las microalgas, el cual depende de las características del cultivo. Entre los métodos de cosecha de la biomasa de las microalgas se pueden encontrar: centrifugación, sedimentación, filtración, flotación y floculación (24).

Hernández-Pérez y col. (24) recogen un breve resumen sobre los principales métodos de cosecha de la biomasa de las microalgas. Estos métodos son los siguientes:

- **Centrifugación:** Es un método rápido y eficaz para la separación de la biomasa. El mayor inconveniente es que no es económicamente viable para la recolección a gran escala, necesita mucha energía y muchos equipos. Este método es válido si el valor de los productos es elevado.
- **Sedimentación por gravedad:** Es el método más eficiente en relación con su efectividad y costo de realización. Posee la ventaja de servir para diferentes tipos de microalgas.
- **Filtración:** Es un método utilizado para la separación de sólido-líquido. Se considera eficiente en la separación de células grandes, como *Spirulina*, pero no en las especies de menor tamaño como *Chlorella*. Sin embargo, suelen tener un elevado coste en energía.
- **Flotación de la biomasa de algas:** Es un método innovador en la recolección de algas unicelulares pequeñas y ensayos de laboratorio. La técnica consiste en la incorporación de gases, como el ozono o el aire, que interactúan con la carga de las paredes celulares permitiendo la flotación de las microalgas y su

separación. Económicamente el precio se ve incrementado por la utilización de ozono.

- Floculación convencional: La técnica consiste en la dispersión de carga. La adición de sales metálicas hace que interactúen con la carga negativa de las microalgas permitiendo la agregación. Esta técnica se puede combinar con sedimentación, filtración o flotación haciendo estos métodos mas eficientes. Pero, los residuos que se producen interfieren en la pureza del producto final.

5. Discusión.

5.1. Valor nutricional de las microalgas

Dependiendo de las características ambientales donde se lleva a cabo su crecimiento y desarrollo pueden presentar una composición nutricional muy diferente.

Por tanto, las microalgas presentan unas características diferentes a los vegetales tradicionales a la que la población está acostumbrada. Sin embargo, debemos pensar cual es la cantidad máxima que podemos ingerir al día de estos alimentos. El resultado es que los estudios han demostrado que no existe ningún efecto adverso del consumo de estos alimentos en pequeñas dosis. Por tanto, el consumo de las microalgas se debe dar de forma complementaria a una dieta normal. Los resultados muestran que no es posible realizar una alimentación basada únicamente en estos alimentos, los motivos se deben básicamente a las dosis que se pueden ingerir, ya que solo tenemos constancia de que el consumo en pequeñas cantidades de estas sustancias no presenta efectos adversos. Actualmente, se están estudiando las formas de introducir la biomasa de estas microalgas a alimentos tradicionales para mejorar su perfil nutricional y aportar las ventajas de ambos alimentos.

5.2. Diferencias entre los valores nutricionales de los vegetales tradicionales y las principales especies de microalgas comercializables

Todos los datos comparativos, que se muestran a continuación, están extraídos de la Tabla 2 y de la Tabla 3.

Proteínas

El alimento con mayor contenido proteico es la *Spirulina platensis* con un contenido de un 63%. Seguidamente encontramos a *Chlorella vulgaris* y *Dunaliella salina* con un contenido de hasta un 60% y 55% respectivamente. Por parte de los vegetales tradicionales, los grupos con mayor contenido proteico son las legumbres y los frutos

secos. Dentro de las legumbres destaca la soja con un 35,9% de proteínas, seguidamente irían las lentejas (24,8%), alubias (22,2%) y por último los garbanzos (19,3%). Los frutos secos tendrían cantidades menores de proteína. Dentro de este grupo destacan las almendras frente a las nueces con un contenido de proteínas de 19,1% frente a un 14%. El grupo de los cereales no destaca por tener grandes contenidos en proteínas, a excepción de la avena y el centeno con un contenido de 16,9% y 15% respectivamente.

Carbohidratos

En cuanto al contenido de carbohidratos el grupo de los cereales destaca por encima del resto. El alimento con mayor contenido de hidratos de carbono es el maíz con un 85,6% lo siguen el centeno (79,8%), la avena (66,3%) y finalmente el trigo (61%). Dentro del grupo de las microalgas destaca *Chlorella vulgaris* con un contenido que puede llegar hasta el 50%, y *Dunaliella salina* que puede llegar hasta un 40%. Las legumbres es otro de los grupos que más porcentaje de carbohidratos posee, gira entorno al 50 y 40% de su peso, a excepción de la soja. Destacan los garbanzos con un contenido de hidratos de carbono de 49,2%. Le sigue las lentejas (48,7%) y alubias (41,6%). El contenido de hidratos de carbono de la soja es muy pequeño, tan solo de un 9,7%.

Lípidos

El grupo que presenta mayor porcentaje de lípidos es el de los frutos secos. Las nueces tienen un 63,3% de lípidos y las almendras un 45,2%. A continuación, encontraríamos algunas de las especies de microalgas, como *Chlorella vulgaris* y *Dunaliella salina*, que pueden llegar a tener hasta un 26% y 17%. El resto de los grupos no presenta grandes cantidades de lípidos. Sin embargo, podemos destacar dentro del grupo de las legumbres a la soja que posee un 18,6% de lípidos. Por parte de los cereales el que mayor contenido de lípidos presenta es la avena con un 6,9%.

Fibra

Los alimentos que presentan un mayor contenido de fibra son las microalgas. Estas pueden llegar a tener hasta un 40%, como es el caso de la *Spirulina platensis*. *Chlorella vulgaris* y *Haematococcus pluvialis* pueden llegar a tener hasta un 35%. En cambio, *Dunaliella salina* presenta los niveles más bajos de fibra de este grupo (9%). Otros grupos con grandes cantidades de fibra son las legumbres y los cereales. La legumbre con mayor cantidad de fibra es la alubia con un 19,7% y la que menos tiene es la lenteja con un 9,7%. La soja y los garbanzos giran alrededor de un 15%. El cereal con mayor contenido en

fibra es el centeno con un 14,6%. El trigo y la avena están alrededor del 10%, mientras que el maíz tan solo posee un 2,7%.

5.3. Las microalgas como farmacia natural

Gracias a los principales bioactivos que se pueden encontrar en la biomasa de las microalgas se han clasificado como un alimento funcional. Los alimentos funcionales son aquellos que aportan beneficios fisiológicos o que mejoran el bienestar y la salud, y reducen el riesgo de enfermedades. Esta característica viene dada sobre todo por las grandes cantidades de proteínas, ácidos grasos polinsaturados, polisacáridos, vitaminas y minerales que presentan (11).

A continuación, se detallan algunos efectos beneficiosos encontrados a través del consumo de microalgas sobre diferentes patologías con una alta incidencia sobre la población.

5.3.1. Dislipidemias

Las dislipidemias son uno de los factores principales asociados a enfermedades crónicas no transmisibles (ECNT), en concreto la enfermedad cardiovascular (ECV) que es la primera causa de muerte a nivel mundial. Estas dislipidemias se caracterizan por altas concentraciones séricas de triacilgliceroles (TAG), colesterol total (CT), colesterol asociado a lipoproteínas de baja densidad (C-LDL) y baja concentraciones de colesterol asociado a lipoproteínas de alta densidad (C-HDL) (25).

Hernández-Lepe y col. (25) analizaron una serie de 6 estudios realizados en humanos a los cuales suplementaron con *Spirulina*. Los resultados concluyen en una disminución sérica de CT, TAG, C-LDL y aumento de C-HDL. Pero ni las dosis empleadas, ni la duración del tratamiento, ni la población fueron homogéneas, tampoco se estudió el mecanismo de acción por el cual disminuye el perfil graso. Por tanto, aún faltan estudios para poder afirmar que la *Spirulina* tiene efecto hipolipemiante.

En otro estudio publicado por Mazokopakis, y col. (26) estudiaron el efecto hipolipemiante de la suplementación con 1g de *Spirulina platensis* durante 3 meses en una población (52 participantes) Griega que padecían dislipidemia (CT >200 mg/dL, TG >150 mg/dL, C-HDL <40 mg/dL). Los resultados dieron con una disminución significativa de los niveles de CT de $281,6 \pm 24,6$ a $256,5 \pm 21,6$ mg/dL ($p < 0,0001$), TG de $166,3 \pm 29,2$ mg/dL a $139,1 \pm 23,4$ mg/dL ($p < 0,0001$), C-LDL de $211,8 \pm 24,8$ a $190,5 \pm 20,3$ mg/dL ($p < 0,0001$). Los niveles de C-HDL incrementaron en un 3,5% pero

este incremento no fue significativo. Tampoco se vieron modificados los niveles de presión sanguínea ni el peso de los sujetos estudiados. No se encontraron efectos adversos. Los autores concluyen que aun con las limitaciones presentes en su estudio (una muestra pequeña, ausencia de grupo de control) los resultados demostraron que la suplementación con 1g de *Spirulina platensis* tuvo efectos hipolipemiantes.

En el estudio publicado por Ryu y col. (22) tenían como hipótesis que la suplementación diaria con *Chlorella* mejora los niveles de lípidos en suero gracias al poder de los carotenoides. Para comprobar su hipótesis decidieron realizar el estudio en el que tenían una muestra de 68 pacientes con hipercolesterolemia a los que asignaban aleatoriamente en el grupo placebo o en el grupo de intervención, a los cuales les darían una dosis de 5g al día de *Chlorella vulgaris* durante 4 semanas. Evaluarían los niveles de CT, TG, lipoproteínas, apolipoproteínas y los carotenoides (luteína, zeaxantina, α -caroteno, β -caroteno). Los resultados fueron los siguientes. Primero que todo no se encontraron efectos adversos en cuanto a la suplementación con *Chlorella*. Se observaron diferencias significativas para CT ($p = 0,036$), TG ($p = 0,002$), VLDL-C ($p = 0,032$), no HDL-C ($p = 0,006$) y HDL-C/TG ($p = 0,023$) entre el grupo placebo y el grupo con suplementación, indicando los efectos positivos. Los niveles de luteína/zeaxantina y α -caroteno incrementaron significativamente en el grupo de suplementación ($p < 0,0001$). Estos cambios de TG y CT parecen estar asociados con los cambios en los carotenoides. Como conclusión, destacan que los carotenoides tienen un gran potencial para disminuir las concentraciones de TG. Sin embargo, no pueden relacionar los cambios de carotenoides con cambios en CT.

En otro estudio realizado por Kim y col. (27) querían ver como la suplementación con *Chlorella* podía afectar a los niveles de colesterol en pacientes sanos. Le dieron a cada participante del estudio una caja con 21 huevos, los cuales se tenían que comer a lo largo de 1 semana, 3 huevos por día. Los investigadores querían que aumentaran los niveles de colesterol. A partir de aquí lo que hicieron fue dividir a la muestra en grupo control y grupo de intervención. A los del grupo control les darían placebo, y a los del grupo de intervención les darían suplementación con 5g de *Chlorella* al día durante 3 semanas. Los resultados fueron que después de las 4 semanas los niveles de CT, LDL-C y HDL-C incrementaron significativamente en el grupo placebo. En cambio, en el grupo con suplementación, los niveles de CT y LDL-C fueron suprimidos (9,8% a 3,5% $p = 0,037$; 14,3% a 1,7% $p = 0,012$), y los de HDL-C fueron incrementados (3,8% a 8,3%). Estos

resultados confirmaron la hipótesis que tenían los investigadores, ya que observaron efectos beneficiosos de la suplementación con 5g de Chlorella. Independientemente, son necesarios más estudios que avalen estos resultados.

En cuanto al posible mecanismo de acción Fallah y col. (5) sugieren que la clave se basa en los carotenoides (luteína, zeaxantina, α -caroteno, β -caroteno) que posee esta microalga. Chlorella tiene grandes cantidades de estos compuestos y además se ha visto que la biodisponibilidad es muy elevada. Estas fibras solubles, se unen junto a la grasa disminuyendo la absorción de esteroides (como el colesterol) en el intestino. El mecanismo de absorción en el intestino de los carotenoides es similar a los de los lípidos. Estos son empaquetados en micelas entrando en los enterocitos y, después, transportados por quilomicrones. Se puede asumir que la presencia de los carotenoides que provienen de la suplementación con Chlorella compiten en el intestino con la absorción y transporte de los lípidos, esto genera una disminución de los lípidos en plasma, y, por tanto, una reducción de peso. Al existir tanta similitud entre los carotenoides y el colesterol, parece que gracias al incremento de los carotenoides por la suplementación con Chlorella hacen que se supriman los receptores de LDL-C en la superficie de las células al igual que disminuye la biosíntesis de colesterol. Por otro lado, los carotenoides incrementan los receptores de LDL-C en los macrófagos y mejoran la capacidad de estos para captar LDL-C en el plasma, lo que da como resultado una disminución de las concentraciones de LDL-C en plasma.

Estos estudios muestran una relación positiva entre el consumo de biomasa de microalgas con un efecto hipolipemiante en pacientes que presentan dislipidemias, gracias a los componentes bioactivos, en especial a los carotenoides. Son necesarios más estudios que investiguen sobre este efecto.

5.3.2. Obesidad

La obesidad es uno de los principales problemas de salud del mundo y su prevalencia va creciendo rápidamente. Está asociado con otros problemas como eventos cardiovasculares, diabetes, síndrome metabólico, hipertensión hasta cáncer (28).

En el estudio doble ciego que realizaron Zeinalian y col. (28) tenían como objetivo determinar los efectos que produce la suplementación de 1g de *Spirulina platensis* durante 12 semanas en parámetros antropométricos, niveles de lípidos séricos, apetito y el factor de crecimiento endotelial vascular (VEGF). El factor de crecimiento endotelial vascular

es un biomarcador en obesidad y obesidad relacionada con la progresión de cáncer. En el estudio se dividió a la muestra (64 personas con obesidad entre 20-50 años) en dos grupos, uno el de intervención al cual se le daban 2 dosis de 500mg de Spirulina al día. Y el otro grupo, el de control el cual tomaba un placebo. Los resultados fueron los siguientes. Por un lado, disminuyó el IMC de ambos grupos, pero el del grupo de intervención que tomaba Spirulina fue significativamente mayor que el grupo de placebo, de $33,35 \pm 2,81$ a $32,71 \pm 2,80$ ($p < 0,001$) frente a $32,71 \pm 3,18$ a $32,47 \pm 3,24$ ($p = 0,01$). VEGF no tuvo cambios significativos, al igual que TG y LDL. En cuanto al apetito, este disminuyó de forma significativa ($p=0,008$). Sin embargo, el CT sí que disminuyó de forma significativa, pasó de $190,48 \pm 35,25$ mg/dL a $180,10 \pm 31,13$ mg/dL en el grupo de intervención. En conclusión, se demostró que la suplementación con Spirulina con una dosis de 1g al día tiene efecto en la regulación del peso corporal, la reducción de apetito y la disminución de colesterol total en personas con obesidad. Pero son necesarios más estudios que tengan más muestra de población y con una intervención más duradera.

En otro estudio publicado por Suliburska y col. (29) se asociaba la suplementación de 2g de *Spirulina máxima* al día durante 3 meses con una disminución del hierro en plasma de los pacientes obesos. Este estudio de doble ciego tiene una muestra de 50 pacientes obesos con hipertensión tratada. Los resultados fueron que el consumo de Spirulina resultó en una disminución significativa de las concentraciones de hierro en suero, pasó de $16,63 \pm 3,75$ $\mu\text{mol/L}$ a $12,98 \pm 2,75$ $\mu\text{mol/L}$ ($p = 0,008$). Según el estudio la depleción de hierro regula la absorción de la glucosa e incrementa la actividad receptora de insulina en los hepatocitos y esto a su vez inhibe el estrés oxidativo. Estos resultados pueden dar a suponer que el efecto protector de la Spirulina en el síndrome metabólico y la obesidad pueden estar mediados por la mejora de la homeostasis del hierro. Como conclusión, está demostrado que la *Spirulina máxima* es capaz de reducir los niveles de hierro en suero en los pacientes obesos con hipertensión.

5.3.3. Síndrome metabólico

El síndrome metabólico está considerado como un factor de riesgo cardiovascular. Es una agrupación de anormalidades metabólicas como son la obesidad central, intolerancia a la glucosa, dislipidemia e hipertensión arterial (30). Como podemos observar reúne una gran parte de los problemas tratados con anterioridad. Por tanto, en este apartado trataré los posibles beneficios que puede dar en cuanto al control de la glucemia.

En el metaanálisis publicado por Hamedifard y col. (30) se mostró que existe un efecto positivo en la suplementación con Spirulina y los efectos beneficiosos en la mejora de la glucosa plasmática en ayunas. Además, se vio que la suplementación con Spirulina también ayudó a disminuir los niveles de insulina en pacientes con síndrome metabólico, obesidad y diabetes mellitus. Se ha observado que la Spirulina no afecta a los niveles de hemoglobina glicosilada (HbA1c). Por otro lado, otro de los resultados mostró una reducción significativa de la glucosa plasmática en ayunas junto con la glucosa postprandial y los niveles de HbA1c en pacientes con diabetes mellitus 2 con una dosis de 2g al día de Spirulina durante al menos 2 meses. En cuanto al mecanismo de acción, algunos autores sugieren que el responsable en el impacto hipoglucémico de la Spirulina se encuentra en la fibra que contiene, que hace disminuir la absorción de la glucosa. Otros autores, sugieren que la Spirulina al ser una fuente rica de proteínas de alta calidad estimula la secreción de insulina lo cual es responsable de disminuir los niveles de glucosa postprandial en la sangre. Son necesarios más estudios para poder concluir con una afirmación exacta, y poder conocer el mecanismo de acción.

5.3.4. Antioxidantes

El estrés oxidativo y la inflamación contribuyen a la aparición de enfermedades cardiovasculares, arterioesclerosis, hipertensión, fallo cardíaco, entre otras. La sobreproducción de especies reactivas del oxígeno (ROS) indica que existe un estrés oxidativo. A su vez, ROS contribuye a la disfunción y al daño de las células endoteliales. Además, la oxidación del LDL también produce la aterogénesis. Para combatir este problema se necesitan agentes antioxidantes o antiinflamatorios que puedan producir efectos beneficiosos (19).

En el artículo de revisión publicado por Deng y col. (19) analizaron varios estudios realizados en humanos para ver si la Spirulina tiene capacidad antioxidante o antiinflamatoria. En uno de los estudios que analizaron, se utilizó una dosis de 7,5mg por día de Spirulina durante 8 semanas. El resultado fue que hubo una disminución significativa de los niveles de IL-6 en suero, y la producción de IL-6 por parte de los linfocitos también disminuyó. En otro estudio con una dosis mayor, 8g al día durante 16 semanas, dio como resultado un aumento significativo de las concentraciones de IL-2 en plasma con una reducción de la concentración de IL-6. Por otro lado, se analizaron más estudios para establecer si la Spirulina puede tener efecto en la prevención de la fatiga en el musculo esquelético, gracias a su poder antioxidante. En un estudio en el que había una

muestra de 16 estudiantes, se les dio una dieta que contenía el 5% de Spirulina por 3 semanas, el resultado fue que hubo una disminución significativa del marcador oxidativo en plasma MDA con una mayor actividad en la sangre de la superóxido dismutasa. En otro estudio realizado a 9 sujetos se les dio una dosis de 8g al día de Spirulina por 4 semanas, los resultados fueron un aumento prolongado del tiempo antes de la fatiga, y un aumento de los niveles de antioxidantes. Teniendo todo esto en cuenta, la Spirulina podría tener un efecto preventivo en la fatiga del musculo esquelético gracias a su poder antioxidante. Sin embargo, en otra revisión publicada por Braakhuis y col. (31) donde estudiaron suplementos con antioxidantes para los deportistas, no encontraron que existiera una clara relación entre el consumo de Spirulina y efectos positivos en la fatiga del músculo esquelético. En cuanto al mecanismo de acción se debe al poder que tiene la ficocianina de neutralizar radicales libres.

Okada y col. (32) estudiaron el efecto antioxidante de una suplementación con 6g al día de Chlorella durante 4 semanas. La población de muestra eran 27 adultos sanos de Fukuoka. Querían observar cómo influía el consumo de Chlorella frente al estrés oxidativo y la fatiga producida por una actividad física normal. Separaron a la población en grupo control, al que le daban placebo, y otro grupo de intervención, al que suministraban la suplementación con Chlorella. Los resultados fueron escasos, ya que no hubo ninguna diferencia significativa entre el grupo de control y el de intervención en cuanto a los marcadores de estrés oxidativo. Sin embargo, sí que se vieron modificados los niveles de MDA (malondialdehído, es un marcador de la peroxidación de los lípidos), disminuyendo en el grupo de Chlorella frente al de placebo después de la intervención. El incremento de los niveles de antioxidantes inhibe la oxidación de los tejidos del cuerpo, incluyendo los lípidos. Esto, se traduce en una disminución de los niveles de MDA que indican una reducción en la oxidación de los lípidos. Aunque los resultados no hayan marcado una diferencia significativa entre ambos grupos no quiere decir que no exista un efecto beneficioso del consumo de Chlorella. Sino que hay otros factores que pueden modificar estos resultados. Por ejemplo, al tratarse de una actividad física de baja intensidad, no se ha llegado a producir suficiente estrés oxidativo. En conclusión, los resultados muestran que sí que existe un efecto antioxidante que mejora el estrés oxidativo y la fatiga, pero que estos efectos pueden ser más favorables en personas con fatiga crónica.

También se ha estudiado la capacidad antioxidante de la luteína que es el caroteno principal que contiene la microalga *Chlorella* relacionándolo con la demencia. En 2 estudios publicados por Miyazawa y col. (33,34) se observó que las concentraciones de PLOOH (fosfolípido hidroperóxido) que se encuentran en pacientes con enfermedades mentales como la demencia y el Alzheimer son elevadas. Se ha sugerido que grandes concentraciones de PLOOH en los eritrocitos intervienen en la habilidad que tienen para transportar oxígeno hacia el cerebro, facilitando la demencia. La suplementación con *Chlorella* aumenta los niveles de luteína y esto tenía un efecto antioxidante en las membranas de los eritrocitos disminuyendo la acumulación de PLOOH, contribuyendo a la prevención de la demencia.

En el estudio publicado por Régnier y col. (35) estudiaron la capacidad antioxidante de la astaxantina y compararon la astaxantina natural que se puede obtener de la microalga *Haematococcus pluvialis* contra la astaxantina sintética y ver cuál tiene más efecto. La cadena polar de la astaxantina cruza la membrana de la célula permitiendo que la parte polar de la molécula se vea expuesta en el citoplasma. Esta disposición facilita la transferencia del electrón del citoplasma al exterior de la célula. La astaxantina puede tener efecto sinérgico con la vitamina C, la cual recargaría a la astaxantina cuando esta haya captado ROS. Para la comparación entre astaxantina natural y astaxantina sintética se utilizaron dos pruebas: TEAC (capacidad antioxidante equivalente trolox) y ORAC (capacidad antioxidante de radicales de oxígeno). Los resultados fueron favorables para la astaxantina natural frente a la sintética (TEAC: 4,37 frente a 1,32, ORAC: 8,1 frente a 1,68). Por tanto, concluyeron que la astaxantina tiene capacidad para inhibir el estrés oxidativo producido en las células endoteliales, y que la astaxantina natural tiene mayor actividad antioxidante que la astaxantina sintética.

5.3.5. Antiinflamatorio

La inflamación es una respuesta biológica frente a un estímulo físico o químico, asociado con los mediadores proinflamatorios como iNOS, COX-2, varias citoquinas e interleuquinas (ILs) y el factor de necrosis tumoral (TNF- α). La expresión de estos mediadores está controlada por factor nuclear kB (NF-kB). El problema está con la superproducción de estos mediadores en una inflamación crónica, lo que puede desarrollar enfermedades como artritis o arteriosclerosis. Los ácidos grasos provenientes de la dieta pueden modular la respuesta de las células disminuyendo la inflamación. Los ácidos

grasos que tienen más poder son los omega-3, incluyendo el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el ácido docosahexaenoico (DHA) (7).

En el estudio publicado por Chintrajali y col. (7) evaluaron el poder antiinflamatorio que posee la microalga *Dunaliella salina* gracias a su concentración de ácidos grasos omega-3. Para ello, analizaron los mediadores proinflamatorios TNF- α , IL-6, MMPs y COX-2. Los resultados mostraron que el ácido graso omega-3 puede inhibir la producción de los mediadores IL-6 y TNF- α y COX-2, gracias a la inhibición de NF-kB, el cual es esencial para la estimulación inflamatoria. Estos resultados mostraron el poder antiinflamatorio que posee el omega-3 que podemos encontrar en la microalga *Dunaliella salina*. Pero, son necesario más estudios para conocer el mecanismo de acción en detalle.

Se ha reportado que la astaxantina puede inhibir la expresión o producción de mediadores inflamatorios y citoquinas en las células y primeros macrófagos mediante la supresión del NF-kB por la captación de ROS. También, sugieren que puede inhibir la expresión de la COX-2 y reducir significativamente la producción de citoquinas proinflamatorias como TNF- α e IL-6 (36).

5.4. Una nueva agricultura

Hoy en día la mayor producción de las microalgas se da en cultivos de exterior, donde el uso de la luz solar evita altísimos sobrecostos asociados a la iluminación artificial de los cultivos. La estrategia más adecuada parece ser la de afrontar el crecimiento de los cultivos en sistemas fotobiorreactores donde las condiciones de crecimiento estén continuamente controladas. Sin embargo, esto también supone un coste muy elevado, sobre todo en las primeras etapas de la construcción de una planta de producción. Por tanto, hasta que no se desarrolle la tecnología, es dificultoso establecer estrategias de producción rentables utilizando sistemas muy controlados.

La eficiencia que presentan las microalgas a la hora de transformar la energía captada de la luz solar en biomasa es mayor que la plantas terrestres, un 3% frente a un 0,2-2% respectivamente. Además, las microalgas tienen una productividad de biomasa mucho mayor que las plantas terrestres, alrededor de 10 a 50 veces más. Por tanto, con menos recursos son capaces de generar mayor cantidad de lípidos, proteínas y carbohidratos a grandes escalas (10). En un futuro la producción de microalgas tomará un gran peso en la forma de alimentación de la población, ya que presentan importantes ventajas frente a la forma de producción de los vegetales.

Un correcto desarrollo de los cultivos de las microalgas y una integración por parte de estas al mercado puede producir grandes ventajas económicas y medioambientales. La energía, el agua, la tierra y los materiales para el cultivo y el desarrollo se podrían ver reducidos y optimizados (10).

6. Conclusión

A lo largo de este trabajo se ha podido observar el estudio de algunas especies de microalgas comercializadas (*Spirulina*, *Chlorella*, *Dunaliella* y *Haematococcus*), dando especial énfasis a la comparativa entre estas especies de microalgas y los vegetales tradicionales, así como los principales componentes bioactivos que presentan y su efecto sobre diferentes patologías. También, se ha estudiado la sostenibilidad de las microalgas como nueva forma de agricultura.

Se ha comprobado que estas especies de microalgas pueden llegar a producir cantidades mucho más abundantes de ciertos nutrientes como proteínas y lípidos frente a los vegetales más consumidos por la población española. Este hallazgo no supone que se halla de realizar una sustitución de un tipo de alimentación por otra, puesto que no es posible una alimentación exclusiva a base de microalgas, debido a las pequeñas dosis que se pueden consumir al día por la legislación, ya que solo se ha demostrado que no son tóxicas a dosis bajas. Lo que parece más conveniente a nivel nutricional es una combinación del consumo de microalgas con los vegetales tradicionales para mejorar el perfil nutricional de nuestra alimentación.

A partir de los resultados obtenidos en los estudios, se ha podido comprobar que los componentes bioactivos que son capaces de producir las microalgas presentan grandes beneficios sobre las patologías que más afectan a nuestra población. Son necesarios más estudios que demuestren estas características y que se conozca el mecanismo de acción por el cual actúan. Además, es necesario que se establezca una dosis homogénea, ya que la mayoría de los estudios utilizaban dosis diferentes.

En cuanto a la implantación del cultivo de microalgas como una nueva rama de la agricultura es necesario que se produzcan muchos avances tecnológicos para poder contrarrestar el alto coste de producción que conlleva el cultivo masivo y resolver las dificultades en cuanto a la extracción y los métodos de tratamiento para su uso.

7. Bibliografía

- (1) Montignac M. Historia de la alimentación del ser humano. 2010.
- (2) Gutiérrez-Salmeán G, Fabila-Castillo L, Chamorro-Cevallos G. Nutritional and toxicological aspects of Spirulina (Arthrospira). *Nutrición Hospitalaria* 2015 Jul 1;;32(1):34-40.
- (3) Deng R, Chow T. Hypolipidemic, Antioxidant, and Antiinflammatory Activities of Microalgae Spirulina. *Cardiovascular Therapeutics* 2010 Aug;28(4):e33-e45.
- (4) Serban M, Sahebkar A, Dragan S, Stoichescu-Hogea G, Ursoniu S, Andrica F, et al. A systematic review and meta-analysis of the impact of Spirulina supplementation on plasma lipid concentrations. *Clinical Nutrition* 2015;35(4):842-851.
- (5) Fallah AA, Sarmast E, Habibian Dehkordi S, Engardeh J, Mahmoodnia L, Khaledifar A, et al. Effect of Chlorella supplementation on cardiovascular risk factors: A meta-analysis of randomized controlled trials. *Clinical Nutrition* 2018 Dec;37(6):1892-1901.
- (6) Gallego-Cartagena E, Castillo-Ramírez M, Martínez-Burgos W. Effect of stressful conditions on the carotenogenic activity of a Colombian strain of Dunaliella salina. *Saudi Journal of Biological Sciences* 2019 Nov;26(7):1325-1330.
- (7) T C, Chandran P A, Kurup G M. Omega-3 fatty acid concentrate from Dunaliella salina possesses anti-inflammatory properties including blockade of NF- κ B nuclear translocation. *Immunopharmacology and Immunotoxicology* 2015 Feb;37(1):81-89.
- (8) Ambati RR, Phang SM, Ravi S, Aswathanarayana RG. Astaxanthin: Sources, Extraction, Stability, Biological Activities and Its Commercial Applications—A Review. *Marine drugs* 2014 Jan 7;;12(1):128-152.
- (9) Camacho Kurmen JE, González G, Klotz B. Producción de Astaxantina en Haematococcus pluvialis bajo diferentes condiciones de estrés. *Nova* 2013 Jun 15;;11(19):93.
- (10) Buono S, Langellotti AL, Martello A, Rinna F, Fogliano V. Functional ingredients from microalgae. *Food & Function* 2014;5(8):1669-1685.
- (11) Camacho F, Macedo A, Malcata F. Potential Industrial Applications and Commercialization of Microalgae in the Functional Food and Feed Industries: A Short Review. *Marine drugs* 2019 May 28;;17(6):312.
- (12) Fradique M, Batista AP, Nunes MC, Gouveia L, Bandarra NM, Raymundo A. Incorporation of Chlorella vulgaris and Spirulina maxima biomass in pasta products. Part 1: Preparation and evaluation. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 2010 Aug 15;;90(10):1656-1664.

- (13) Abd El Baky, Hanaa H, El Baroty GS, Ibrahem EA. Functional characters evaluation of biscuits sublimated with pure phycocyanin isolated from *Spirulina* and *Spirulina* biomass. *Nutrición Hospitalaria* 2015 Jul 1,;32(1):231-241.
- (14) Aecosan - Agencia Española de Consumo, Seguridad Alimentaria y Nutrición. Available at:
http://www.aecosan.msssi.gob.es/en/AECOSAN/web/seguridad_alimentaria/detalle/nuevos_alimentos.htm.
- (15) Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. Informe del consumo alimentario en España. 2018:247-355.
- (16) Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. Dirección General de Producciones y Mercados Agrarios. 2019.
- (17) Base de datos española de composición de alimentos. Bedca. Available at:
<https://www.bedca.net/bdpub/index.php>.
- (18) Molino A, Iovine A, Casella P, Mehariya S, Chianese S, Cerbone A, et al. Microalgae Characterization for Consolidated and New Application in Human Food, Animal Feed and Nutraceuticals. *International journal of environmental research and public health* 2018 Nov 1,;15(11):2436.
- (19) Deng R, Chow T. Hypolipidemic, Antioxidant, and Antiinflammatory Activities of Microalgae *Spirulina*. *Cardiovascular Therapeutics* 2010 Aug;28(4):e33-e45.
- (20) Fassett RG, Coombes JS. Astaxanthin: A Potential Therapeutic Agent in Cardiovascular Disease. *Marine drugs* 2011 Mar 21,;9(3):447-465.
- (21) Brendler T, Williamson EM. Astaxanthin: How much is too much? A safety review. *Phytotherapy Research* 2019 Dec;33(12):3090-3111.
- (22) Ryu NH, Lim Y, Park JE, Kim J, Kim JY, Kwon SW, et al. Impact of daily *Chlorella* consumption on serum lipid and carotenoid profiles in mildly hypercholesterolemic adults: a double-blinded, randomized, placebo-controlled study. *Nutrition journal* 2014 Jun 11,;13(1):57.
- (23) Cajamar. Cultivo de microalgas a gran escala: sistemas de producción. 2016.
- (24) Hernández-Pérez A, Labbé JI. Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de biología marina y oceanografía* 2014 Aug;49(2):157-173.
- (25) Hernández Lepe MA, Wall-Medrano A, Juárez-Oropeza MA, Ramos-Jiménez A, Hernández-Torres RP. *Spirulina* and its hypolipidemic and antioxidant effects in humans: a systematic review. *Nutrición hospitalaria* 2015 Aug 1,;32(2):494-500.
- (26) Mazokopakis EE, Starakis IK, Papadomanolaki MG, Mavroeidi NG, Ganotakis ES. The hypolipidaemic effects of *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) supplementation in a Cretan population: a prospective study. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 2014 Feb;94(3):432-437.

- (27) Kim S, Kim J, Lim Y, Kim YJ, Kim JY, Kwon O. A dietary cholesterol challenge study to assess *Chlorella* supplementation in maintaining healthy lipid levels in adults: a double-blinded, randomized, placebo-controlled study. *Nutrition journal* 2016 May 13;15(1):54.
- (28) Zeinalian R, Farhangi MA, Shariat A, Saghafi-Asl M. The effects of *Spirulina Platensis* on anthropometric indices, appetite, lipid profile and serum vascular endothelial growth factor (VEGF) in obese individuals: a randomized double blinded placebo controlled trial. *BMC complementary and alternative medicine* 2017 Apr 21;17(1):225.
- (29) Suliburska J, Szulińska M, Tinkov A, Bogdański P. Effect of *Spirulina maxima* Supplementation on Calcium, Magnesium, Iron, and Zinc Status in Obese Patients with Treated Hypertension. *Biol Trace Elem Res* 2016 Sep;173(1):1-6.
- (30) Hamedifard Z, Milajerdi A, Reiner Ž, Taghizadeh M, Kolahdooz F, Asemi Z. The effects of spirulina on glycemic control and serum lipoproteins in patients with metabolic syndrome and related disorders: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Phytotherapy Research* 2019 Oct;33(10):2609-2621.
- (31) Braakhuis A, Hopkins W. Impact of Dietary Antioxidants on Sport Performance: A Review. *Sports Med* 2015 Jul;45(7):939-955.
- (32) Okada H, Yoshida N, Kakuma T, Toyomasu K. Effect of *Chlorella* Ingestion on Oxidative Stress and Fatigue Symptoms in Healthy Men. *The Kurume Medical Journal* 2017;64(4):83-90.
- (33) Miyazawa T, Nakagawa K, Kimura F, Nakashima Y, Maruyama I, Higuchi O, et al. *Chlorella* is an Effective Dietary Source of Lutein for Human Erythrocytes. *Journal of Oleo Science* 2013;62(10):773-779.
- (34) Miyazawa T, Nakagawa K, Takekoshi H, Higuchi O, Kato S, Kondo M, et al. Ingestion of *Chlorella* Reduced the Oxidation of Erythrocyte Membrane Lipids in Senior Japanese Subjects. *Journal of Oleo Science* 2013;62(11):873-881.
- (35) Régnier P, Bastias J, Rodriguez-Ruiz V, Caballero-Casero N, Caballo C, Sicilia D, et al. Astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* Prevents Oxidative Stress on Human Endothelial Cells without Toxicity. *Marine drugs* 2015 May 7;13(5):2857-2874.
- (36) Yuan J, Peng J, Yin K, Wang J. Potential health-promoting effects of astaxanthin: A high-value carotenoid mostly from microalgae. *Molecular Nutrition & Food Research* 2011 Jan;55(1):150-165.